

**Regressão Logística entre Poluição do Ar e Mortalidade por Doenças
Respiratórias em Santa Gertrudes, SP (2014-2023)**

Pollyane Vieira da Silva

Professora Doutora, UFPEL, Brasil
pollyane.silva@ufpel.edu.br

Magda Adelaide Lombardo

Professora Doutora, USP, Brasil.
magdalombardo@yahoo.com.br

RESUMO

A poluição atmosférica é um problema ambiental crítico que afeta a saúde humana em muitas regiões ao redor do mundo. Em cidades com intensa atividade industrial, como Santa Gertrudes, SP, a concentração de material particulado, como o MP_{10} , pode ter impactos significativos na saúde respiratória da população. Este estudo visa, utilizando modelagem estatística avançada investigar a relação entre a concentração de MP_{10} e a mortalidade por doenças respiratórias. O objetivo principal foi aplicar modelos lineares generalizados, especificamente regressão logística, para analisar como a concentração de MP_{10} influencia a mortalidade de pacientes internados por doenças respiratórias na cidade de Santa Gertrudes durante o período de 2014 a 2023. A metodologia envolveu a construção e comparação de vários modelos logísticos para avaliar o efeito do MP_{10} e de variáveis adicionais sobre a mortalidade, como umidade relativa do ar e velocidade do vento. A qualidade dos modelos foi avaliada utilizando o critério de informação de Akaike (AIC) e a deviance. Os resultados mostraram que $MP_{10}lag_4$ e "dias de permanência internado" foram as variáveis estatisticamente significativas. A razão de chances (odds ratio) associada ao $MP_{10}lag_4$ indicou um aumento de aproximadamente 0,8% na chance de óbito para cada incremento de $1 \mu g/m^3$ na concentração de MP_{10} . A variável "dias de permanência internado" aumentou a chance de óbito em cerca de 6,7% por dia adicional de internação, destacando a necessidade de políticas públicas voltadas à redução da poluição e o manejo adequado das condições de saúde na região.

PALAVRAS-CHAVE: Saúde Pública. Modelagem Estatística. Material particulado.

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica representa um dos maiores desafios ambientais tanto em escala global quanto local. A exposição prolongada a uma atmosfera contaminada por material particulado pode acarretar danos significativos à saúde humana, exacerbando problemas respiratórios preexistentes e desencadeando condições adversas. Este cenário é especialmente preocupante em regiões fortemente industrializadas, onde as atividades produtivas contribuem significativamente para a emissão de poluentes atmosféricos.

O polo cerâmico de Santa Gertrudes, SP, desponta como uma área de particular interesse devido à concentração de atividades industriais de longa data, cujas emissões podem impactar diretamente a qualidade do ar local e, conseqüentemente, a saúde da população residente. O polo cerâmico de Santa Gertrudes é composto por oito cidades, sendo uma delas a própria cidade de Santa Gertrudes e as cidades vizinhas, Araras, Cordeirópolis, Ipeúna, Itacemópolis, Limeira, Piracicaba e Rio Claro.

É importante destacar que esse polo desempenha um papel significativo na produção nacional e estadual de revestimentos cerâmicos. Em 2022, a indústria brasileira registrou o número de 927 milhões de metros quadrados (m^2) de revestimentos cerâmicos produzidos, sendo 736,4 milhões comercializados no mercado interno e 130,4 milhões para exportações. Esse destaque no cenário mundial é resultado do desenvolvimento da capacidade da indústria local, em especial do Estado de São Paulo. O Polo de Santa Gertrudes foi responsável por 70% da produção nacional em 2020, como mostraram os dados da Associação Paulista das Cerâmicas de Revestimento (Aspacer) (ALESP, 2023).

Nas indústrias de piso e revestimento cerâmico, a principal fonte de poluição do ar é o forno da queima, em que verifica-se as emissões de material particulado, óxidos de nitrogênio, metais, cloro e fluoretos, e em menor proporção óxido de enxofre e hidrocarbonetos totais

(POLI, 2002). O tamanho das partículas está diretamente associado ao seu potencial para causar problemas à saúde, sendo que quanto menores, maiores são os efeitos provocados.

As partículas inaláveis (MP_{10}) podem ser definidas de maneira simplificada como aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a 10 μm . Dependendo da distribuição de tamanho na faixa de 0 a 10 μm , podem ficar retidas na parte superior do sistema respiratório ou penetrar mais profundamente, alcançando os alvéolos pulmonares (CETESB, 2024).

É importante destacar que a concentração de poluentes está fortemente relacionada a condições meteorológicas. Alguns dos parâmetros que favorecem altos índices de poluição são alta porcentagem de calmaria, ventos fracos e inversões térmicas a baixa altitude. Esse fenômeno é particularmente comum no inverno paulista, quando as noites são frias e a temperatura tende a se elevar rapidamente durante o dia, provocando alteração no resfriamento natural do ar (CETESB, 2024).

Neste estudo propõem-se estudar a relação da exposição a poluentes do ar nos óbitos por doenças respiratórias dos municípios do polo cerâmico de Santa Gertrudes considerando também algumas variáveis meteorológicas.

Desta forma, torna-se importante utilizar ferramentas capazes de monitorar a concentração de material particulado (MP) nas regiões sob a influência do polo. Além disso, o vasto conhecimento sobre os efeitos adversos do material particulado à saúde torna evidente a necessidade de que, além da estimativa das concentrações de material particulado, também seja analisada a associação entre MP e os óbitos por doenças do aparelho respiratório.

As doenças do aparelho respiratório (CID-10) foram responsáveis por 148.773 óbitos em 2020, ficando acima das mortes por causas externas (acidentes e violências) e abaixo das doenças do aparelho circulatório, doenças infecto-parasitárias e neoplasias, segundo informações do Sistema de Informação de Mortalidade do DATASUS (MOREIRA, 2023).

Dentre as doenças respiratórias existentes temos a COVID-19, doença que provocou uma pandemia nos últimos anos e que levou milhares de pessoas a óbito devido a complicações dessa síndrome respiratória causada por coronavírus. Essa pesquisa pode revelar o impacto da poluição do ar na saúde humana e contribuir para que medidas de conscientização sejam tomadas.

2 OBJETIVOS

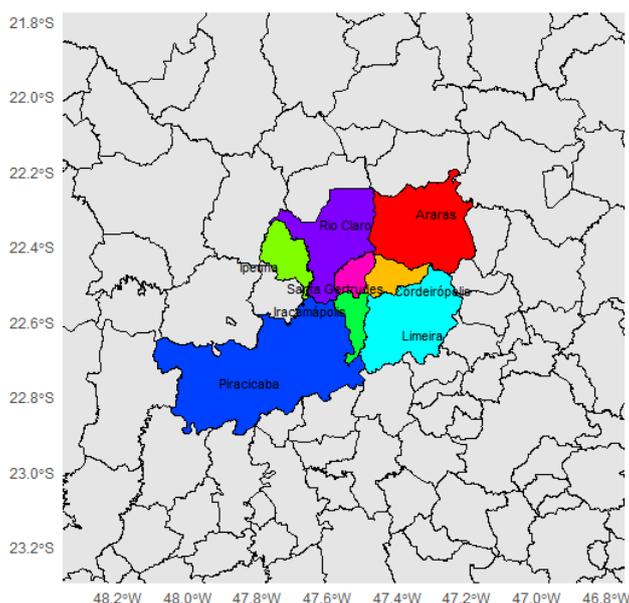
O objetivo deste artigo foi aplicar modelagem estatística por meio de modelos lineares generalizados, utilizando regressão logística para investigar a relação entre a concentração de material particulado, MP_{10} , e os óbitos de pacientes internados por doenças respiratórias na cidade de Santa Gertrudes durante o período de 2014 a 2023. Além de avaliar o impacto potencial na saúde pública, esta pesquisa busca contribuir para a conscientização e adoção de medidas mitigadoras por parte das indústrias cerâmicas, visando uma gestão ambiental mais sustentável e a melhoria da qualidade de vida na região.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Classifica-se a presente pesquisa como um estudo ecológico de série temporal sobre a exposição da população de Santa Gertrudes, SP, ao material particulado MP_{10} e os óbitos resultantes de doenças respiratórias (com CID de códigos J00 - J99 e B32.4).

Situado estrategicamente no estado de São Paulo, o Polo Cerâmico de Santa Gertrudes não é apenas um ponto de referência na indústria cerâmica brasileira, mas também um pilar de influência no panorama econômico estadual. Dentro do polo cerâmico, a união de diversas cidades forma um núcleo dinâmico de produção e inovação. A Figura 1 mergulha nessa dinâmica, aproximando-se para mostrar com detalhes as cidades que constituem este polo.

Figura 1: Cidades que compõem o polo cerâmico de Santa Gertrudes, SP



Fonte: Mapa criado com o software R utilizando o pacote ggplot2.

Dados da Aspacer estimam que em 2006 a produção estadual de revestimentos cerâmicos foi de 380 milhões de metros quadrados, sendo que desse total, 323 milhões de metros quadrados foram produzidos no polo de Santa Gertrudes.

Com uma população de 23.611 pessoas e uma densidade demográfica de aproximadamente 240,22 habitantes por quilômetro quadrado em uma área territorial de 98,291km², Santa Gertrudes foi, segundo o IBGE (2022), escolhida como a região de estudo principal dada a concentração significativa de indústrias cerâmicas nesse município em relação aos demais do polo.

Para o cenário delimitado no estudo, selecionaram-se dados públicos provenientes dos órgãos de pesquisa governamentais Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS), de um período de 10 anos, de 2014 a 2023.

A extração dos dados de concentração de MP_{10} e variáveis meteorológicas foi realizada pelo site da CETESB. Selecionou-se o período do estudo, a estação (o município) e os parâmetros de interesse. O sistema limita a escolha de três parâmetros por vez, e para este trabalho foram escolhidos: MP_{10} , Umidade Relativa (UR) e Velocidade do Vento (VV).

Buscou-se no sistema DATASUS informações referentes aos óbitos e internações por doenças respiratórias no período delimitado. A tabela histórica de internações e óbitos foi compilada exclusivamente com dados de Santa Gertrudes. O primeiro critério de seleção utilizado foi o código do município de residência (MUNIC RES), uma vez que nosso foco é nas pessoas que residem em Santa Gertrudes, independentemente de terem sido internadas em cidades vizinhas.

Para otimizar a tabela DATASUS para esta pesquisa, foram selecionados apenas os atributos pertinentes, com filtragem no diagnóstico principal por meio dos códigos CID 10 de J00 a J99 (doenças do aparelho respiratório) e B32.4 (infecção por coronavírus de localização não especificada). Para trabalhar com os dados diários de óbitos por doenças do aparelho respiratório foram utilizados modelos lineares generalizados (MLGs) via regressão logística. A seleção dos melhores modelos foi feita pelos valores de Akaike (AIC) e a Deviance. Para verificar a qualidade do ajuste foi gerado um gráfico de envelope simulado utilizando o pacote hnp (MORAL; HINDE; DEMÉTRIO, 2017) do R (R CORE TEAM, 2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, foi ajustado um modelo logístico (M_1) tendo a variável de desfecho "óbito" como dependente e a variável "MP₁₀", juntamente com uma defasagem de 7 dias de MP₁₀, os lags, como variáveis preditoras. Os coeficientes estimados, os erros-padrão e os respectivos valores de p de M_1 foram apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes estimados, os erros-padrão e os respectivos valores de p de M_1

Variável	Estimativa	Erro-padrão	Valor de p
Intercepto	-3,439	0,658	1,73e⁻⁷
MP ₁₀	0,004	0,013	0,743
MP ₁₀ lag ₁	-0,001	0,016	0,975
MP ₁₀ lag ₂	-0,022	0,017	0,185
MP ₁₀ lag ₃	0,002	0,015	0,913
MP ₁₀ lag ₄	0,037	0,014	0,008
MP ₁₀ lag ₅	-0,006	0,015	0,719
MP ₁₀ lag ₆	-0,006	0,017	0,716
MP ₁₀ lag ₇	-0,003	0,013	0,841

Fonte: As autoras (2024).

Conforme apresentado na Tabela 1, apenas a variável "MP₁₀lag₄" foi estatisticamente significativa no primeiro modelo. Diante disso, no segundo modelo (M_2) a variável "MP₁₀lag₄" foi mantida e foram adicionadas as variáveis meteorológicas "umidade relativa do ar (UR)" e "velocidade do vento (VV)" para investigar o impacto das condições climáticas sobre os óbitos.

Os coeficientes estimados, os erros-padrão e os valores de p do modelo M_2 estão detalhados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes estimados, os erros-padrão e os respectivos valores de p de M_2

Variável	Estimativa	Erro-padrão	Valor de p
----------	------------	-------------	------------

Intercepto	-6,569	1,714	1,27e⁻⁴
MP ₁₀ lag ₄	0,025	0,007	2,26e⁻⁴
UR	0,036	0,018	0,047
VV	-0,140	0,499	0,779

Fonte: As autoras (2024).

A significância estatística da variável "UR" no modelo M₂ corrobora com outros estudos existentes e está alinhada com algumas recomendações da CETESB. No inverno, dias com baixa umidade do ar e alta concentração de poluentes são frequentes, o que agrava problemas respiratórios. Nessas condições, o ressecamento das mucosas pode levar a sangramentos nasais, ressecamento da pele e irritação ocular, favorecendo o surgimento de complicações respiratórias.

No terceiro modelo (M₃) foram mantidas as variáveis estatisticamente significativas dos modelos anteriores e adicionou-se uma variável relacionada à saúde, "dias de permanência internado". Os coeficientes estimados, erros-padrão e valores de p para M₃ estão apresentados na Tabela 3, fornecendo uma visão mais ampla sobre o impacto dessas variáveis na mortalidade por doenças respiratórias.

Tabela 3 - Coeficientes estimados, os erros-padrão e os respectivos valores de p de M₃

Variável	Estimativa	Erro-padrão	Valor de p
Intercepto	-6,247	1,265	7,85e⁻⁷
MP ₁₀ lag ₄	0,021	0,006	2,35e⁻⁴
UR	0,021	0,015	0,151
Dias de permanência	0,168	0,028	2,15e⁻⁹

Fonte: As autoras (2024).

Com a configuração de M₃, as variáveis significativas foram MP₁₀lag₄ e Dias de permanência. Dessa forma, o modelo final (MF) foi definido como aquele que inclui apenas essas variáveis significativas. A expressão do modelo final é dada por:

$$\acute{o}bito = \beta_0 + \beta_1 PM10lag4 + \beta_2 \text{Dias de hospitalização} + \epsilon$$

Esse modelo sugere que o aumento na concentração de MP₁₀, com defasagem de 4 dias, e o número de dias de internação estão diretamente associados ao aumento da probabilidade de óbito por doenças respiratórias.

O modelo final foi testado utilizando três diferentes funções de ligação: probit, logit e complemento log-log. Com todas essas funções de ligação, as variáveis "MP₁₀lag₄" e "dias de permanência internado" mantiveram-se estatisticamente significativas. A qualidade do ajuste foi avaliada por meio do critério de informação de Akaike (AIC) e da deviance, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de AIC e Deviance do Modelo Final (MF)

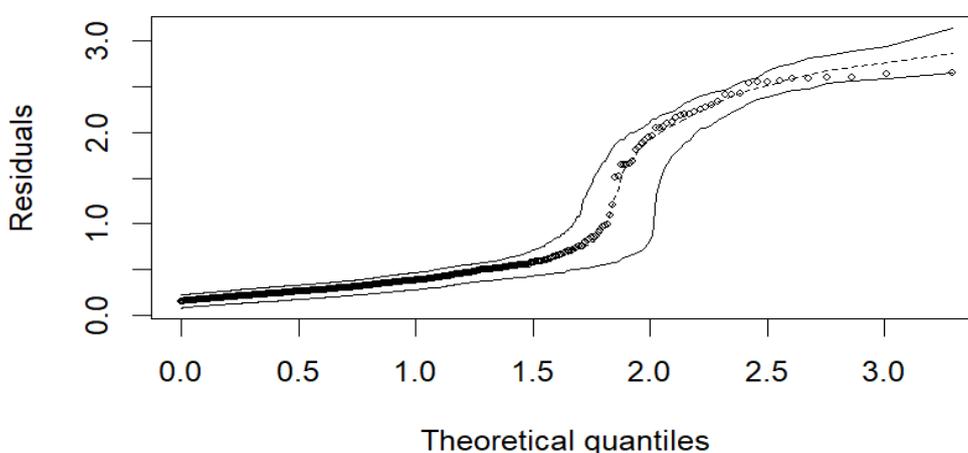
Função de Ligação	AIC	Deviance
Probit	275,20	269,20

Logit	276,32	270,32
Complemento log-log	276,75	270,75

Fonte: As autoras (2024).

O modelo com a função de ligação probit apresentou menor AIC e deviance em comparação com os outros modelos, sugerindo melhor ajuste aos dados. Além disso, a análise de resíduos com o Half-Normal Plot (hnp) (Figura 2) reforçou a adequação do modelo, indicando uma boa distribuição dos resíduos.

Figura 2 – Gráfico hnp do Modelo Final com função de ligação probit



Fonte: As autoras (2024).

O modelo final estimado foi:

$$\acute{o}bito = -2,387 + 0,008 MP_{10}lag_4 + 0,067 \text{ Dias de permanência}$$

Os coeficientes estimados para o modelo final indicaram que a razão de chances (odds ratio) associada à variável "MP₁₀lag₄" foi de 1,008 para cada aumento de uma unidade no MP₁₀. Isso significa que para cada incremento de 1 µg/m³ na concentração de MP₁₀, a chance de óbito aumenta em aproximadamente 0,8%, mantendo as outras variáveis constantes.

Já a variável "dias de permanência internado" apresentou um coeficiente estimado de 0,067, indicando que para cada dia adicional de internação, a chance de óbito aumenta em cerca de 6,7%, conforme a razão de chances de 1,067.

5 CONCLUSÃO

Este estudo utilizou a modelagem estatística por meio de regressão logística para investigar a associação entre a poluição do ar, condições meteorológicas e a mortalidade por doenças respiratórias na cidade de Santa Gertrudes, SP, no período de 2014 a 2023. Os resultados indicaram que a concentração de MP₁₀ com defasagem de 4 dias (MP₁₀lag₄) foi um importante preditor de óbito, sugerindo que para cada incremento de 1 µg/m³ na concentração de MP₁₀lag₄, a chance de óbito aumentou em aproximadamente 0,8%.

A adição de variáveis meteorológicas, como umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (VV), no segundo modelo (M_2), corroborou com a literatura, mostrando que condições climáticas adversas, como baixa umidade durante o inverno, podem agravar problemas respiratórios, o que está em linha com recomendações da CETESB.

No modelo final (MF), as variáveis "MP₁₀lag₄" e "dias de permanência internado" se mantiveram significativas. A análise da razão de chances revelou que para cada dia adicional de internação, a chance de óbito aumentou em 6,7%, reforçando a relevância dos cuidados hospitalares prolongados para pacientes com doenças respiratórias.

A comparação entre diferentes funções de ligação (probit, logit e complemento log-log) demonstrou que todas as variáveis permaneceram significativas, com o critério de Akaike (AIC) e a deviance indicando que o modelo com função de ligação probit apresentou o melhor ajuste aos dados.

Este estudo destaca a influência significativa da poluição atmosférica, especialmente MP₁₀, e de fatores meteorológicos e clínicos na mortalidade por doenças respiratórias. Essas descobertas reforçam a necessidade de políticas públicas que controlem a qualidade do ar, particularmente durante períodos críticos de baixa umidade, e de intervenções mais eficazes para reduzir o tempo de hospitalização visando minimizar os riscos de complicações fatais.

6 AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Universidade de São Paulo (USP) e ao Departamento de Ciências Florestais pelo apoio e pela infraestrutura fornecida durante o Programa de Pós-Doutorado, que resultou na coleta e análise dos dados apresentados neste estudo.

7 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ALESP. **Com 92% da produção estadual, Santa Gertrudes se destaca como "Capital da Cerâmica de Revestimento"**. São Paulo: ALESP, 2023. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/noticia/?id=456564>. Acesso em: 16 set. 2024.

ASPACER. Associação Paulista das Cerâmicas de Revestimento. 2024. Disponível em: <https://www.aspacer.com.br/>. Acesso em: 16 set. 2024.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em: 12 jul. 2023.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Índices de Qualidade do Ar. 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/#:~:text=O%20material%20particulado%20pode%20tamb%C3%A9m,de%20rea%C3%A7%C3%B5es%20qu%C3%ADmicas%20no%20ar>. Acesso em: 16 set. 2024.

DATASUS. Departamento de Informação e Informática do Sistema Único de Saúde. 2015. Disponível em: <http://www.datasus.gov.br>. Acesso em: 12 jul. 2023.

DATASUS. Departamento de Informação e Informática do Sistema Único de Saúde. Morbidade Hospitalar do SUS. Disponível em: <https://datasus.saude.gov.br/aceso-a-informacao/morbidade-hospitalar-do-sus-sih-sus/>. Acesso em: 19 out. 2023.

MORAL, R. A.; HINDE, J.; DEMÉTRIO, C. G. B. Half-normal plots and overdispersed models in R: the hnp package. *Journal of Statistical Software*, California, v. 81, n. 10, p. 1-23, 2017.

MOREIRA, M. **Doenças respiratórias são a quarta causa de morte evitável no país.** Disponível em: <https://medicinas.com.br/doencas-respiratorias-morte/>. Acesso em: 16 set. 2024.

POLI, M. C. **Emissões de flúor nas indústrias de pisos cerâmicos dos municípios de Cordeirópolis e Santa Gertrudes situação e recomendações.** Monografia de Especialização. UNICAMP. 2002. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/escolasuperior/wp-content/uploads/sites/30/2016/06/Maria_Cristina_Poli.pdf. Acesso em: 16 set. 2024.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing.** Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 16 set. 2024.

DECLARAÇÕES

Contribuição de Cada Autor

Concepção e Design do Estudo: Pollyane Vieira da Silva, sob a supervisão de Magda Adelaide Lombardo.

Curadoria de Dados: Pollyane Vieira da Silva organizou e verificou os dados, garantindo sua qualidade.

Análise Formal: Pollyane Vieira da Silva foi responsável por realizar as análises estatísticas aplicadas.

Aquisição de Financiamento: Não aplicável/não houve aquisição de financiamento externo para este estudo (ou incluir o responsável, se houver).

Investigação: Pollyane Vieira da Silva conduziu a investigação e coleta de dados necessários.

Metodologia: Pollyane Vieira da Silva desenvolveu e ajustou as metodologias utilizadas no estudo.

Redação - Rascunho Inicial: Pollyane Vieira da Silva redigiu a primeira versão do manuscrito.

Redação - Revisão Crítica: Magda Adelaide Lombardo revisou o texto, contribuindo para a clareza e coerência do conteúdo.

Revisão e Edição Final: Magda Adelaide Lombardo realizou a revisão e edição final do manuscrito, garantindo a conformidade com as normas da revista.

Supervisão: Magda Adelaide Lombardo supervisionou a pesquisa, coordenando o trabalho e assegurando a qualidade geral do estudo.

Declaração de Conflitos de Interesse

Nós, Pollyane Vieira da Silva e Magda Adelaide Lombardo, **declaramos que o manuscrito intitulado "Regressão Logística entre Poluição do Ar e Mortalidade por Doenças Respiratórias em Santa Gertrudes, SP (2014-2023)"**

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho. (Detalhe aqui, se aplicável: "Nenhuma instituição ou entidade financiadora esteve envolvida no desenvolvimento deste estudo").
2. **Relações Profissionais:** Não possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados. (Detalhe aqui, se aplicável: "Nenhuma relação profissional relevante ao conteúdo deste manuscrito foi estabelecida").
3. **Conflitos Pessoais:** Não possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito. (Detalhe aqui, se aplicável: "Nenhum conflito pessoal relacionado ao conteúdo foi identificado").